饲粮异亮氨酸水平对肥育猪生长性能、胴体性状和肉品质的影响

罗燕红　张　鑫　覃春富　焦　宁　尹靖东*

（中国农业大学动物科技学院，动物营养学国家重点实验室，北京 100193）

摘　要：本试验旨在研究饲粮异亮氨酸水平对肥育猪生长性能、胴体性状和肉品质的影响。选取体重为（77.0±0.1） kg 的杜×长×大三元杂交去势公猪 72 头，随机分为 3 组，每组 6 个重复，每个重复 4 头猪。4 组试验猪分别饲喂含 0.25%（低异亮氨酸水平，表现为异亮氨酸缺乏，L-Ile 组）、0.39%（NRC 推荐异亮氨酸水平，N-Ile 组，作为对照组）和 0.53%（高异亮氨酸水平，表现为异亮氨酸超量添加，H-Ile 组）标准回肠可消化异亮氨酸的饲粮。试验期为 28 d。结果表明：饲粮异亮氨酸水平对肥育猪的平均日增重和平均日采食量没有显著影响（*P*>0.05），但 L-Ile 组料重比较对照组显著增加（*P*<0.05）；随着饲粮异亮氨酸水平的增加，肥育猪背最长肌肌内脂肪含量线性提高（*P*<0.05），而剪切力线性下降（*P*<0.05）；与对照组相比，采食异亮氨酸缺乏饲粮的肥育猪的背膘厚、眼肌面积和肉色评分显著降低（*P*<0.05），采食异亮氨酸缺乏或超量添加饲粮的肥育猪的热胴体重、屠宰率以及背最长肌滴水损失和黄度值均显著降低（*P*<0.05）；随着饲粮异亮氨酸水平的增加，血清甘油三酯含量线性提高（*P*<0.05），血清尿素氮含量线性下降（*P*<0.05）；与对照组相比，采食异亮氨酸超量添加饲粮的肥育猪的血清葡萄糖含量显著增加（*P*<0.05），采食异亮氨酸缺乏饲粮的肥育猪的血清中游离的必需氨基酸、非必需氨基酸和总氨基酸的浓度显著降低（*P*<0.05），而采食异亮氨酸缺乏或超量添加饲粮的肥育猪血清总胆固醇、低密度脂蛋白和高密度脂蛋白含量均显著降低（*P*<0.05）。由此得出，饲粮中异亮氨酸缺乏对肥育猪生长性能、胴体性状和肌内脂肪含量有负面影响，而超量添加异亮氨酸会显著改善肌肉的剪切力和滴水损失，增加

收稿日期：2016-12-14
基金项目：国家 973 计划项目（2012CB124700）；国家自然科学基金项目（31272452）
作者简介：罗燕红（1990—），女，四川眉山人，硕士研究生，从事营养与肉品质研究。E-mail: xt19910312@163.com
*通信作者：尹靖东，研究员，博士生导师，E-mail: yinjd @cau.edu.cn

肌内脂肪含量，但会以降低热胴体重、屠宰率为代价。

关键词：异亮氨酸；生长性能；胴体性状；肉品质；血清生理生化指标；血清游离氨基酸

随着经济的发展和人们生活水平的提高，对肉类的需要从数量向质量发生转变。2015年中国全年猪、牛、羊、禽肉产量 8 625.0 万 t，其中猪肉产量 5 486.5 万 t[1]，占总肉类产量的 60%以上，但由于生产者过度追求生长速度、饲料转化效率和瘦肉率，导致猪肉品质下降[2]。畜牧生产中提高生长性能的同时也要关注猪肉品质。

支链氨基酸包括亮氨酸、异亮氨酸和缬氨酸，是主要在肝外组织氧化的必需氨基酸，主要氧化部位在肌肉[3]。大量研究表明支链氨基酸对体内能量平衡和脂质代谢发挥重要作用[4-6]，但是关于支链氨基酸之一的异亮氨酸的研究较少，而且以往的研究主要关注其需要量。研究表明，饲粮中异亮氨酸缺乏时显著降低肥育猪的生长性能[7-10]，但进一步添加异亮氨酸对肥育猪生长性能没有显著影响[7-8]。生产中肥育猪饲粮中异亮氨酸常常缺乏，但饲粮异亮氨酸水平对猪胴体性状和肉品质的影响鲜有报道，Dean 等[8]发现玉米-豆粕饲粮中添加异亮氨酸后呈二次曲线模式增加肥育猪背膘厚、总脂肪含量和体脂百分比，但异亮氨酸对猪肉品质的影响目前还尚不清楚。因此，本研究通过在饲粮中添加不同水平的异亮氨酸，研究异亮氨酸缺乏或超量添加对肥育猪胴体性状和肉品质的影响，为改善猪肉品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计与饲粮

选取体重为（77.0±0.1） kg 的杜×长×大三元杂交去势公猪 72 头，根据初始体重随机分为 3 个组，每组 6 个重复，每个重复 4 头。4 组试验猪分别饲喂含 0.25%（低异亮氨酸水平，表现为异亮氨酸缺乏，L-Ile 组）、0.39%（NRC 推荐异亮氨酸水平，N-Ile 组，作为对照组）和 0.53%标准回肠可消化异亮氨酸（高异亮氨酸水平，表现为异亮氨酸超量添加，H-Ile 组）的试验饲粮。试验饲粮以玉米-豆粕型饲粮配方为基础，通过添加合成氨基酸，使除异亮氨酸外的其他所有必需氨基酸及氮水平满足 NRC（2012）肥育猪（75～100 kg）饲养标准

推荐量，并通过调节饲粮丙氨酸含量使 3 种试验饲粮处于等氮水平。试验饲粮组成及营养水平见表 1。

表 1　试验饲粮组成及营养水平（饲喂基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of experimental diets (as-fed basis)　　%

项目 Items	L-Ile	N-Ile	H-Ile
原料 Ingredients			
玉米 Corn	85.17	85.14	85.08
豆粕 Soybean meal	5.46	5.46	5.46
小麦麸 Wheat bran	3.00	3.00	3.00
豆油 Soybean oil	1.11	1.11	1.11
石粉 Limestone	0.95	0.95	0.95
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	0.62	0.62	0.62
食盐 NaCl	0.35	0.35	0.35
L-赖氨酸盐酸盐 *L*-Lys•HCl	0.55	0.55	0.55
DL-蛋氨酸 *DL*-Met	0.17	0.17	0.17
L-苏氨酸 *L*-Thr	0.20	0.20	0.20
L-色氨酸 *L*-Try	0.06	0.06	0.06
L-异亮氨酸 *L*-Iso		0.14	0.28
L-缬氨酸 *L*-Val	0.13	0.13	0.13
L-组氨酸盐酸盐 *L*-His•HCl	0.06	0.06	0.06
L-苯丙氨酸 *L*-Phe	0.07	0.07	0.07
L-丙氨酸 *L*-Ala	0.38	0.27	0.19
L-谷氨酸 *L*-Glu	0.55	0.55	0.55
甘氨酸 Gly	0.50	0.50	0.50
预混料 Premix[1)]	0.67	0.67	0.67
合计 Total	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels			
粗蛋白质 CP[2)]	12.21	11.93	12.05
赖氨酸 Lys[2)]	0.77	0.77	0.76
蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys[2)]	0.51	0.51	0.51
苏氨酸 Thr[2)]	0.50	0.50	0.50
色氨酸 Trp[2)]	0.14	0.14	0.14
异亮氨酸 Ile[2)]	0.32	0.45	0.58
亮氨酸 Leu[2)]	0.94	0.92	0.92
缬氨酸 Val[2)]	0.50	0.50	0.50
钙 Ca[2)]	0.56	0.56	0.57
总磷 TP[2)]	0.36	0.36	0.37
消化能 DE/(MJ/kg)[3)]	14.16	14.16	14.16
代谢能 ME/(MJ/kg)[3)]	13.85	13.85	13.85

标准回肠可消化氨基酸 Standardized ileal digestible amino acids			
赖氨酸 Lys3)	0.73	0.73	0.73
蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys3)	0.42	0.42	0.42
苏氨酸 Thr3)	0.46	0.46	0.46
色氨酸 Trp3)	0.13	0.13	0.13
异亮氨酸 Ile3)	0.25	0.39	0.53
亮氨酸 Leu3)	1.00	1.00	1.00
缬氨酸 Val3)	0.48	0.48	0.48
钙 Ca3)	0.52	0.52	0.52
有效磷 AP3)	0.24	0.24	0.24

1) 预混料为每千克饲粮提供 The premix provided the following per kg of diets：VA 6 000 IU，VB_1 0.96 mg，VB_2 4 mg，VB_6 2 mg，VB_{12} 0.012 mg，VD_3 2 400 IU，VE 20 IU，VK_3 2 mg，生物素 biotin 0.04 mg，叶酸 folic acid 0.40 mg，泛酸 pantothenic acid 11.2 mg，烟酸 nicotinic acid 22 mg，氯化胆碱 choline chloride 80 mg，甜味剂 sweetener 80 mg，植酸酶 phytase 100 mg，Cu (as copper sulfate) 120 mg，Fe (as ferrous sulfate) 76 mg，Mn (as manganese sulfate) 12 mg，Zn (as zinc sulfate) 76 mg，I (as potassium iodide) 0.24 mg，Se (as sodium selenite) 0.40 mg。

2) 实测值Measured values。

3) 计算值Calculated values。

1.2 饲养管理

试验在农业部饲料工业中心动物试验基地（河北丰宁）进行。采用全封闭式猪舍饲养，试验前对猪舍进行彻底消毒和清理，并对试验猪进行常规驱虫和免疫。猪舍内采用人工控制温度、湿度和通风强度，舍内温度保持在 20 ℃左右。试验猪以重复为单位随机分配到 18 个栏（2.6 m×1.8 m×0.9 m）中，每个栏内设备和条件一致，采用不锈钢可调式料槽，乳头式饮水器，试验猪自由采食和饮水。整个试验过程严格按照猪场饲养管理制度和中国农业大学动物福利相关标准执行。试验期为 28 d。

1.3 样品采集

饲养试验结束时，试验猪禁食 12 h，每栏选取接近平均体重的猪 1 头，前腔静脉采血，静置 0.5 h 后在 4 ℃、3 500 r/min 离心 10 min 制备血清，置于-20 ℃冷冻保存，用于血清生

理生化指标和氨基酸含量分析。次日，将 18 头（每组 6 头）猪运输 45 min 至屠宰场，休息 2 h 后电击致晕放血屠宰，测定胴体品质和肉品质。

1.4 检测指标

1.4.1 饲粮营养组分测定

按照 AOAC（2003）标准测定饲粮原料和饲粮中粗蛋白质、钙、磷（总磷和有效磷）和氨基酸含量。粗蛋白质、钙和磷（总磷和有效磷）的含量分别采用凯氏定氮法、乙二胺四乙酸（EDTA）滴定法和钼酸铵分光光度法测定。氨基酸含量测定方法为：样品经盐酸水解用氨基酸自动分析仪（L-8800，日本）测定 15 种氨基酸含量；经甲酸氧化用氨基酸自动分析仪测定含硫氨基酸含量，经氢氧化钠水解用反相液相色谱仪（Waters2690，MA，美国）测定色氨酸含量。

1.4.2 生长性能测定

于试验开始和结束时对试验猪逐个称重，计算平均日增重（average daily gain，ADG）；每周以栏为单位结料，称重后计算平均日采食量（average daily feed intake，ADFI），根据平均日增重和平均日采食量计算料重比（feed/gain，F/G）

1.4.3 胴体性状测定

将 18 头猪屠宰去头、蹄、毛、尾和内脏（留板油和肾脏）后，参照《瘦肉型猪胴体性状测定技术规范》（NY/T 825-2004）方法测定屠宰率、热胴体重和背膘厚（用游标卡尺测量肩部最厚处、最后肋和腰荐结合处 3 点背膘厚度，取 3 点平均值），用游标卡尺测量最后肋处背最长肌横截面的长度和宽度，眼肌面积按照以下公式计算：

眼肌面积（cm^2）=最后肋处背最长肌横截面长度（cm）×最后肋处背最长肌横截面宽度（cm）×0.7。

1.4.4 肉品质测定

肥育猪屠宰后现场测定肉色、大理石纹评分、肉色评分和 $pH_{45\ min}$（屠宰后 45 min 的 pH）。

取第 10～12 肋骨处背最长肌样，置于 4 ℃冰箱，测定肉样的 $pH_{24\,h}$（屠宰后 45 min 的 pH）和滴水损失，另取 50 g 背最长肌样-20 ℃保存，用于测定肌内脂肪含量。

分别于屠宰后 45 min 和 24 h 时将 pH 计（DK-2730，SFK-Technology，丹麦）电极探头完全包埋于背最长肌中，深度不小于 1 cm，待数值稳定后读取 pH；将背最长肌平置于白色瓷盘中，用大理石纹评分卡和肉色标准评分卡（Oficial color and marbling standards，NPPC，美国）对背最长肌大理石纹和肉色进行评分；采用肉色仪（CR410，Minolta，日本）测定背最长肌肉色[亮度（L*）、红度（a*）、黄度（b*）]。

参照《猪肌肉品质测定技术规范》（NY/T 821-2004）方法测定肉样的滴水损失；切取 1 cm 厚 100 g 左右肉样放在密封袋中置于 70 ℃水浴，待肉中心温度达到 70 ℃时，用吸水纸吸取肉表面附着水，测定烹饪前后背肌重量，计算烹饪损失；另取 100 g 左右肉样于 70 ℃水浴 20 min 后，用 1.27 cm 取样器沿肌纤维走向取 10 个 1 cm 厚的肉样，用肌肉嫩度仪（C-LM3B,Tenovo,哈尔滨）测定肉样剪切力，以 10 个肉样平均值表示为剪切力值。

将-20 ℃保存的背最长肌（约 50 g）切成 2～3 mm 薄片状，置于真空冷冻干燥器（Model 4.5,Labconco Corp，美国）中冷冻干燥 72 h，然后碾磨成粉末状，采用索氏提取法测定肌内脂肪含量。

1.4.5 血清生理生化指标和游离氨基酸含量测定

血清中总胆固醇（total cholesterol，TC）、甘油三酯（triglyceride，TG）、高密度脂蛋白（high density lipoprotein，HDL）、低密度脂蛋白（low density lipoprotein，LDL）、游离脂肪酸（free fatty acid，FFA）和胰岛素含量，利用中生北控科技有限公司试剂盒在全自动生化仪（BS-420，Beckman，美国）上测定；血清中乳酸脱氢酶（lactic dehydrogenase，LDH）、肌酸激酶（creatine jubase，CK）和脂肪酶（lipase，LPS）活性以及尿素氮、葡萄糖含量采用南京建成生物工程研究所的试剂盒测定，严格按照说明书操作。

血清中游离氨基酸浓度采用经典茚三酮柱后衍生法原理用氨基酸分析仪（S-433D，

Sykam，德国）测定，具体操作如下：取 0.5 mL 血清于离心管中，加入 1.5 mL 4%磺基水杨酸振荡摇匀并冰浴 20 min，加入 0.175 mL 氢氧化锂振荡摇匀，电子秤配平后于 4 ℃下 110 000 r/min 离心 30 min，取上清液用 0.1 μm 滤膜过滤后上机测定血清游离氨基酸浓度。

1.5 数据统计分析

试验数据采用 SAS 9.4 统计软件中一般线性模型（GLM）进行线性和二次回归分析，差异显著时采用 Duncan 氏法进行多重比较；P<0.05 为差异显著，0.05≤P<0.10 为有差异显著趋势。

2 结果与分析

2.1 饲粮异亮氨酸水平对肥育猪生长性能的影响

由表 2 可知，饲粮异亮氨酸水平对肥育猪的平均日增重和平均日采食量均无显著影响（P>0.05），但随着异亮氨酸水平的增加，料重比呈线性（P<0.05）和二次（P<0.05）降低。与对照组相比，采食异亮氨酸缺乏饲粮的肥育猪料重比显著升高（P<0.05）。

表 2 饲粮异亮氨酸水平对肥育猪生长性能的影响

Table 2 Effects of dietary Ile level on growth performance of finishing pigs

项目 Items	组别 Groups			SEM	*P* 值 *P*-value	
	L-Ile	N-Ile	H-Ile		线性 Linear	二次 Quadratic
始重 Initial BW/kg	77.1	77.0	77.0	0.10	0.40	0.61
末重 Final BW/kg	103.2	105.9	104.6	1.28	0.44	0.24
平均日增重 ADG/kg	0.85	0.92	0.89	0.04	0.44	0.34
平均日采食量 ADFI/kg	2.84	2.84	2.78	0.11	0.72	0.84
料重比 F/G	3.36[a]	3.08[b]	3.14[b]	0.06	0.03	0.05

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05). The same as below.

2.2 饲粮异亮氨酸水平对肥育猪胴体性状的影响

由表 3 可知，随着饲粮异亮氨酸水平的增加，肥育猪热胴体重呈线性（P<0.05）和二次（P<0.05）增加，背膘厚、屠宰率和眼肌面积呈二次增加（P<0.05）。与对照组相比，采食异亮氨酸缺乏饲粮的肥育猪的热胴体重、屠宰率、背膘厚和眼肌面积均显著降低（P<0.05），采食异亮氨酸超量添加饲粮的肥育猪的热胴体重和屠宰率也显著降低（P<0.05）。

表 3　饲粮异亮氨酸水平对肥育猪胴体性状的影响

Table 3　Effects of dietary Ile level on carcass traits of finishing pigs

项目 Items	组别 Groups			SEM	P 值 P-value	
	L-Ile	N-Ile	H-Ile		线性 Linear	二次 Quadratic
热胴体重 Hot carcass weight/kg	80.03^{c}	86.80^{a}	83.50^{b}	0.99	0.03	<0.01
屠宰率 Dressing percentage/%	74.35^{b}	76.31^{a}	74.59^{b}	0.65	0.80	0.04
背膘厚 Back-fat depth/cm	1.98^{b}	2.23^{a}	2.15^{ab}	0.06	0.05	<0.01
眼肌面积 Loin eye area/cm^{2}	44.29^{b}	50.99^{a}	46.70^{ab}	1.69	0.34	0.02

2.3 饲粮异亮氨酸水平对肥育猪肉品质的影响

由表 4 可知，饲粮异亮氨酸水平对肥育猪的背最长肌 $pH_{45\ min}$、$pH_{24\ h}$、烹饪损失和大理石纹评分均无显著影响（P>0.05）。随着饲粮异亮氨酸水平的增加，肥育猪的背最长肌肌内脂肪含量线性提高（P<0.05）、剪切力线性下降（P<0.05），肉色评分、黄度值和滴水损失呈二次增加（P<0.05）。与对照组相比，采食异亮氨酸缺乏饲粮的肥育猪的背最长肌肉色评分、黄度值和滴水损失显著降低（P<0.05），采食异亮氨酸超量添加饲粮的肥育猪的背最长肌黄

度值和滴水损失显著降低（*P*<0.05）。

表 4　饲粮异亮氨酸水平对肥育猪肉品质的影响

Table 4　Effects of dietary Ile level on meat quality of finishing pigs

项目 Items	组别 Groups			SEM	*P* 值 *P*-value	
	L-Ile	N-Ile	H-Ile		线性 Linear	二次 Quadratic
$pH_{45\ min}$	6.31	6.20	6.38	0.11	0.63	0.30
$pH_{24\ h}$	5.42	5.30	5.33	0.05	0.24	0.25
肉色评分 Flesh color score	3.50^{b}	4.17^{a}	3.75^{ab}	0.16	0.29	0.02
亮度值 L* value	42.84	44.27	43.3	0.67	0.63	0.17
红度值 a* value	15.01	16.1	15.41	0.66	0.68	0.29
黄度值 b* value	1.63^{b}	2.65^{a}	1.65^{b}	0.23	0.96	<0.01
滴水损失 Drip loss/%	2.60^{b}	3.22^{a}	2.17^{c}	0.21	0.17	0.01
烹饪损失 Cooking loss/%	23.54	23.67	23.36	0.85	0.89	0.84
剪切力 Shear force/N	53.15^{a}	48.85^{ab}	43.60^{b}	0.34	0.01	0.84
大理石纹评分 Marbling score	1.83	1.75	2.08	0.26	0.52	0.53
肌内脂肪含量 Intramuscular fat content/%	1.24^{b}	1.59^{ab}	2.51^{a}	0.30	0.01	0.46

2.4　饲粮异亮氨酸水平对肥育猪血清生理生化指标的影响

由表 5 可知，随着饲粮异亮氨酸水平的增加，血清 TG 含量呈线性增加（*P*<0.05），血清尿素氮含量呈线性降低（*P*<0.05），血清 LPS 活性有线性显著增加趋势（*P*=0.08），血清 TC、HDL 和 LDL 含量呈二次增加（*P*<0.05）。与对照组相比，采食异亮氨酸缺乏或超量添

加饲粮的肥育猪血清中 TC、HDL 和 LDL 含量均显著降低（$P<0.05$），采食异亮氨酸超量添加饲粮的肥育猪血清葡萄糖含量显著增加（$P<0.05$）。饲粮异亮氨酸水平对肥育猪血清中 FFA、胰岛素含量及 LDH、CK 活性均没有产生显著影响（$P>0.05$）。

表 5　饲粮异亮氨酸水平对肥育猪血清生理生化指标的影响

Table 5　Effects of dietary Ile level on serum physiological and biochemical indexes of finishing pigs

项目 Items	组别 Groups			SEM	*P* 值 *P*-value	
	L-Ile	N-Ile	H-Ile		线性 Linear	二次 Quadratic
总胆固醇 TC/(mmol/L)	2.64^{b}	3.20^{a}	2.79^{b}	0.07	0.18	<0.01
甘油三酯 TG/(mmol/L)	0.36^{b}	0.41^{b}	0.55^{a}	0.04	0.01	0.44
高密度脂蛋白 HDL/(mmol/L)	0.78^{b}	0.91^{a}	0.77^{b}	0.02	0.80	<0.01
低密度脂蛋白 LDL/(mmol/L)	1.20^{c}	1.49^{a}	1.35^{b}	0.04	0.04	<0.01
游离脂肪酸 FFA/(mmol/L)	0.42	0.47	0.47	0.03	0.25	0.63
葡萄糖 Glucose/(mmol/L)	5.77^{ab}	5.41^{b}	5.91^{a}	0.13	0.47	0.03
尿素氮 UN/(mmol/L)	6.82^{a}	5.77^{b}	4.67^{c}	0.13	<0.01	0.89
脂肪酶 LPS/(U/L)	102.71	106.48	112.80	3.70	0.08	0.78
乳酸脱氢酶 LDH/(U/L)	396.27	403.63	459.82	24.39	0.10	0.43
肌酸激酶 CK/(U/L)	753.60	881.70	811.10	99.97	0.69	0.44
胰岛素 INS/(uIU/mL)	14.42	15.23	15.00	0.42	0.35	0.33

2.5　饲粮异亮氨酸水平对肥育猪血清游离氨基酸浓度的影响

由表 6 可知，饲粮异亮氨酸水平对血清中游离氨基酸浓度影响较大，随着饲粮异亮氨酸水平的增加，血清中组氨酸、异亮氨酸、半胱氨酸和丝氨酸浓度呈线性增加（$P<0.05$），血

清中苏氨酸、丙氨酸和脯氨酸的浓度呈二次增加（$P<0.05$），而血清中亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸、甘氨酸和酪氨酸的浓度呈线性（$P<0.05$）和二次（$P<0.05$）增加。对血清游离氨基酸进行分类汇总分析发现，随着饲粮异亮氨酸水平的增加，血清中必需氨基酸、非必需氨基酸和总氨基酸的浓度呈线性（$P<0.05$）和二次（$P<0.05$）增加。

表 6　饲粮异亮氨酸水平对肥育猪血清游离氨基酸浓度的影响

Table 6　Effects of dietary Ile level on free amino acid concentrations in serum of finishing pigs　μmol/L

项目 Items	组别 Groups			SEM	*P* 值 *P*-value	
	L-Ile	N-Ile	H-Ile		线性 Linear	二次 Quadratic
必需氨基酸 EAA						
精氨酸 Arg	121.95	120.54	114.66	3.02	0.75	0.11
组氨酸 His	33.80^{b}	41.38^{a}	42.87^{a}	2.10	0.02	0.27
异亮氨酸 Ile	19.04^{b}	44.35^{a}	55.40^{a}	3.51	<0.01	0.14
亮氨酸 Leu	53.87^{b}	74.65^{a}	69.73^{a}	2.61	<0.01	<0.01
赖氨酸 Lys	57.30^{b}	105.19^{a}	89.72^{a}	5.87	<0.01	<0.01
蛋氨酸 Met	12.36	16.72	15.25	1.66	0.25	0.19
苯丙氨酸 Phe	23.64^{b}	33.27^{a}	30.66^{a}	1.43	0.01	0.01
苏氨酸 Thr	61.03^{b}	80.75^{a}	69.33^{ab}	4.20	0.20	0.02
色氨酸 Trp	41.64	44.94	53.82	5.82	0.18	0.71
缬氨酸 Val	73.24^{b}	103.03^{a}	94.61^{a}	4.76	0.01	0.01
必需氨基酸 EAA	497.87^{b}	658.94^{a}	641.92^{a}	18.38	<0.01	<0.01
非必需氨酸 NEAA						

丙氨酸 Ala	137.97b	195.75a	162.09ab	11.07	0.16	0.01
天冬氨酸 Asp	1.58	3.69	3.01	0.67	0.17	0.13
半胱氨酸 Cys	5.51b	7.54a	7.80a	0.53	0.02	0.21
谷氨酸 Glu	59.00b	85.24a	75.32ab	7.49	0.16	0.08
甘氨酸 Gly	316.24b	453.88a	427.24a	22.90	0.01	0.02
脯氨酸 Pro	60.36b	110.66a	75.75b	8.74	0.25	<0.01
丝氨酸 Ser	45.37b	60.108a	60.60a	4.07	0.03	0.19
酪氨酸 Tyr	23.67b	32.23a	29.25a	1.32	0.02	0.01
非必需氨基酸 NEAA	649.71b	949.09a	841.55a	41.25	<0.01	<0.01
总氨基酸 TAA	1 147.58b	1 608.03a	1 483.47a	53.78	<0.01	<0.01

3 讨 论

本次试验动物选取（77.0±0.1） kg 的三元杂交去势公猪，国内猪饲养标准（NY/T 65-2004）中瘦肉型生长肥育猪饲粮营养标准只推荐到 60～90 kg 生长阶段，因此试验营养水平参照 NRC（2012）肥育猪（75～100 kg）饲养标准推荐量。如表 1 所示，3 种试验饲粮中除异亮氨酸外其余必需氨基酸的有效含量及氮水平基本一致且满足 NRC（2012）营养需要推荐水平，试验效应主要来源于饲粮中异亮氨酸水平的差异。

3.1 饲粮异亮氨酸水平对肥育猪生长性能的影响

以玉米-豆粕型饲粮配方配制基础饲粮时，异亮氨酸一般不缺乏，当豆粕含量较少、蛋白质水平降低或采用血粉作为部分蛋白质来源时常常发生异亮氨酸缺乏的情况。大量研究表明，以玉米、血粉配制异亮氨酸缺乏的基础饲粮时，随着异亮氨酸水平的增加，肥育猪平均日增重、平均日采食量和肉料比（G/F）显著提高[7,8,11-12]；以玉米、豆粕配制基础饲粮时，异亮氨酸缺乏显著降低料重比[8]、平均日增重和平均日采食量[7]，但在满足异亮氨酸需要量

的基础上再添加异亮氨酸则对生长性能没有显著影响[7-8]。本试验中，饲粮异亮氨酸水平对肥育猪的平均日增重和平均日采食量没有产生显著影响，但料重比随饲粮异亮氨酸水平的增加表现为线性和二次降低，与 Dean 等[8]的研究结果一致。因此，异亮氨酸缺乏会导致肥育猪的料重比下降，但异亮氨酸超量添加没有进一步改善料重比。

3.2　饲粮异亮氨酸水平对肥育猪胴体性状的影响

本试验发现，随着饲粮异亮氨酸水平的增加，肥育猪的热胴体重和背膘厚呈线性和二次增加，屠宰率和眼肌面积呈二次增加，这与 Dean 等[8]在玉米-豆粕型饲粮中添加异亮氨酸的结果部分一致，其发现增加饲粮异亮氨酸水平可以二次增加肥育猪背膘厚、总脂肪含量和体脂百分比，但对眼肌面积和屠宰率没有显著影响。然而，Figueroa 等[13]发现在低蛋白质饲粮中添加异亮氨酸显著降低小母猪第 10 肋背膘厚和眼肌面积，与上述结果不一致，可能与猪的品种、性别、生长阶段、对异亮氨酸的需要和利用不同有关。本试验结果表明，饲粮中异亮氨酸缺乏会降低肥育猪的胴体性状，而超量添加异亮氨酸也会对胴体性状产生不利影响，但不如异亮氨酸缺乏时严重。

3.3　饲粮异亮氨酸水平对肥育猪肉品质的影响

肉品质最关键的特性为肉色、风味、嫩度、多汁性和持水力。Fernandez 等[14]指出，当肌内脂肪含量增加到 2.5%左右时，嫩度、多汁性和风味也大幅度提高；Font-I-Furnols 等[15]发现，当肌内脂肪含量增加时消费者对猪肉的接受性也会提高。本试验发现，增加饲粮异亮氨酸水平提高了肥育猪肌内脂肪含量，降低剪切力，增加了肌肉嫩度。Khliji 等[16]指出肉色是肉品质及肉新鲜度的一个重要指标，而消费者购买肉的决定取决于肉色。本试验发现，异亮氨酸缺乏或超量添加对育肥猪背最长肌的红度值没有显著影响，但显著降低了肉色评分和黄度值。另外，系水力也是肉品质指标之一，表现了屠宰后肉对水分的束缚能力[17]。Savage 等[18]发现随着肉中水分的流失，肌肉中蛋白质和可溶性风味物质也会流失，影响肉品质。Pearce 等[19]也指出水分的存在对肌肉的物理形态、风味、肉色等具有重要的意义。系水力通

常通过滴水损失大小来反映，本试验发现饲粮中异亮氨酸缺乏或超量添加都显著降低了肥育猪背最长肌滴水损失，提高了肌肉的系水力。以上结果表明，饲粮异亮氨酸缺乏虽然降低了滴水损失，但同时也降低了肌内脂肪含量、肌肉嫩度和肉色评分，对肉品质有不利影响；当饲粮异亮氨酸超量添加时，表现出最高肌内脂肪含量、最低剪切力和滴水损失，虽然肉色评分较低，但相对具有较好肉品质。

3.4　饲粮异亮氨酸水平对肥育猪血清生理生化指标的影响

血液生理生化指标可以反映机体生理机能及代谢状况。血清尿素氮是机体蛋白质、氨基酸代谢的终产物，可以较准确地反映机体蛋白质代谢和氨基酸间的平衡，当氨基酸更平衡时，血清尿素氮含量较低[20]。本试验发现，饲粮异亮氨酸水平的增加线性降低了肥育猪血清尿素氮含量，说明本试验条件下，异亮氨酸超量添加的饲粮氨基酸可能更平衡。血脂含量可以反映机体脂类代谢的情况，LDL 能将肝脏合成的内源性胆固醇运到肝外组织，保证组织细胞对胆固醇的需求，而 HDL 能将肝外细胞释放的胆固醇转运到肝脏，防止胆固醇在血中聚积，防止动脉粥样硬化[21]。Sink 等[22]发现血清 TC 的含量与机体脂肪沉积以及人类冠心病的发病率正相关，Anderson 等[23]也指出血清中 TC 或低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)含量增加 1%将会增加 2%～3%患冠心病的风险。本试验中，饲粮异亮氨酸缺乏或超量添加都显著降低了血清中 TC、HDL 和 LDL 含量，但异亮氨酸水平的增加线性增加了血清 TG 含量，且 LPS 活性有增加趋势，说明饲粮异亮氨酸水平影响了机体脂肪代谢，肥育猪背膘厚以及肌内脂肪含量发生变化可能与此有关。另外，饲粮异亮氨酸缺乏或超量添加增加了血清中葡萄糖含量，对机体糖代谢也产生了影响。

3.5　饲粮异亮氨酸水平对肥育猪血清游离氨基酸浓度的影响

血清中氨基酸主要来源于组织蛋白质的降解以及肠道对饲粮营养物质的吸收摄入[24]，餐后 2.5 h 血清氨基酸浓度被认为可以反映饲粮氨基酸吸收情况[25]，餐后 8 h 血清游离氨基酸浓度被认为可以一定程度反映机体氨基酸代谢状况[26]，当饲粮氨基酸满足动物需要时，

氨基酸进一步平衡可以降低血清游离氨基酸浓度。本试验结果发现，异亮氨酸缺乏显著降低血清中游离的必需氨基酸、非必需氨基酸和总氨基酸浓度，具体表现为降低了组氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸、苏氨酸、半胱氨酸、丝氨酸、丙氨酸、脯氨酸、甘氨酸和酪氨酸的浓度。涉及支链氨基酸的研究往往会考虑 3 种氨基酸（亮氨酸、异亮氨酸和缬氨酸）之间的关系，以往研究指出支链氨基酸结构相似，代谢过程中共用支链氨酸转氨酶和脱氢酶使得 3 种氨基酸之间存在拮抗作用[27-28]。大量研究也表明，饲粮中超量添加亮氨酸会显著降低血清中异亮氨酸和缬氨酸的含量[27-28]，Wiltafsky 等[27]指出这种影响是由于超量添加亮氨酸激活肝脏支链酮酸脱氢酶活性引起的。本试验中，与对照组相比，异亮氨酸超量添加降低了血清中亮氨酸和缬氨酸的浓度，与 Cervantes 等[29]的结果一致，但异亮氨酸缺乏时，血清中亮氨酸和缬氨酸的浓度也显著降低，推测可能是异亮氨酸缺乏时机体对支链氨基酸的需要增强，从而增加亮氨酸和缬氨酸的代谢来满足机体需要。Cervantes 等[29]还发现饲粮异亮氨酸超量添加能够显著增加阳离子氨基酸转运载体 1（*CAT*-1）的表达，降低血清中苏氨酸的浓度。本试验中，饲粮中异亮氨酸的超量添加同样引起血清中苏氨酸浓度显著降低，与 Cervantes 等[29]所得结果一致。以上结果表明，饲粮异亮氨酸缺乏降低了机体内氨基酸池，由此对机体蛋白质周转可能产生的影响有待于进一步研究。

4 结　论

① 饲粮异亮氨酸缺乏对肥育猪生长性能、胴体性状和肉品质有负面影响；饲粮异亮氨酸超量添加显著降低血清尿素氮含量、背最长肌的剪切力和滴水损失，增加肌内脂肪含量，但会以降低胴体重、屠宰率为代价。

② 饲粮异亮氨酸水平对机体三大营养物质代谢产生了影响，异亮氨酸缺乏时显著降低血清中游离的必需氨基酸、非必需氨基酸和总氨基酸浓度以及脂类代谢相关指标，增加血清葡萄糖含量；异亮氨酸超量添加显著降低了血清中 TC、HDL 和 LDL 含量，增加了血清中 TG 和葡萄糖含量。

参考文献：

[1] 国家统计局.中国统计年鉴2016[M].北京:中国统计出版社,2016:12–14.

[2] 尹靖东,李德发.猪肉质形成的分子机制与营养调控[J].动物营养学报,2014,26(10):2979–2985.

[3] 刘春生,张大鹏,刘文宽,等.支链氨基酸及其在泌乳母猪营养中的研究现状[J].饲料工业,2006,27(1):25–26.

[4] DUAN Y H,DUAN Y M,LI F N,et al.Effects of supplementation with branched-chain amino acids to low-protein diets on expression of genes related to lipid metabolism in skeletal muscle of growing pigs[J].Amino Acids,2016,48(9):2131–2144.

[5] GOICHON A,CHAN P,LECLEIRE S,et al.An enteral leucine supply modulates human duodenal mucosal proteome and decreases the expression of enzymes involved in fatty acid beta-oxidation[J].Journal of Proteomics,2013,78:535–544.

[6] ARAKAWA M,MASAKI T,NISHIMURA J,et al.The effects of branched-chain amino acid granules on the accumulation of tissue triglycerides and uncoupling proteins in diet-induced obese mice[J].Endocrine Journal,2011,58(3):161–170.

[7] FU S X,KENDALL D C,FENT R W,et al.True ileal digestible (TID) isoleucine:lysine ratio of late-finishing barrows fed corn-blood cell or corn-amino acid diets[J].Journal of Animal Science,2005,82:67.

[8] DEAN D W,SOUTHERN L L,KERR B J,et al.Isoleucine requirement of 80- to 120-kilogram barrows fed corn-soybean meal or corn-blood cell diets[J].Journal of Animal Science,2005,83(11):2543–2553.

[9] KENDALL D C,KERR B J,FENT R W,et al.Determination of the true ileal digestible isoleucine requirement for 90 kg barrows[J].Journal of Animal Science,2004,82(Suppl.2):67.

[10] 郑春田.低蛋白质日粮补充异亮氨酸对猪蛋白质周转代谢和免疫机能的影响[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2000:92–104.

[11] WILTAFSKY M K,BARTELT J,RELANDEAU C,et al.Estimation of the optimum ratio of standardized ileal digestible isoleucine to lysine for eight- to twenty-five-kilogram pigs in diets containing spray-dried blood cells or corn gluten feed as a protein source[J].Journal of Animal Science,2009,87(8):2554–2564.

[12] KENDALL D C.Opportunities and limitations for low-protein diet formulation in swine[D].Ph.D.Thesis.Columbia:University of Missouri-Columbia,2004.

[13] FIGUEROA J L,LEWIS A J,MILLER P S,et al.Growth,carcass traits,and plasma amino acid concentrations of gilts fed low-protein diets supplemented with amino acids including histidine,isoleucine,and valine[J].Journal of Animal Science,2003,81(6):1529–1537.

[14] FERNANDEZ X,MONIN G,TALMANT A,et al.Influence of intramuscular fat content on the quality of pig meat-1.Composition of the lipid fraction and sensory characteristics of m.*longissimus lumborum*[J].Meat Science,1999,53(1):59–65.

[15] FONT-I-FURNOLS M,TOUS N,ESTEVE-GARCIA E,et al.Do all the consumers accept marbling in the same way? The relationship between eating and visual acceptability of pork with different intramuscular fat content[J].Meat Science,2012,91(4):448–453.

[16] KHLIJI S,VAN DE VEN R,LAMB T A,et al.Relationship between consumer ranking of lamb colour and objective measures of colour[J].Meat Science,2010,85(2):224–229.

[17] HUFF-LONERGAN E,LONERGAN S M.Mechanisms of water-holding capacity of meat:the role of postmortem biochemical and structural changes[J].Meat Science,2005,71(1):194–204.

[18] SAVAGE A W J,WARRISS P D,JOLLEY P D.The amount and composition of the proteins in drip from stored pig meat[J].Meat Science,1990,27(4):289–303.
[19] PEARCE K L,ROSENVOLD K,ANDERSEN H J,et al.Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes-A review[J].Meat Science,2011,89(2):111–124.
[20] COMA J,ZIMMERMAN D R,CARRION D.Relationship of rate of lean tissue growth and other factors to concentration of urea in plasma of pigs[J].Journal of Animal Science,1995,73(12):3649–3656.
[21] 计成.动物营养学[M].北京:高等教育出版社,2008.
[22] SINK J D,WILSON L L,MCCARTHY R D,et al.Interrelationships between serum lipids,energy intake,milk-production,growth and body characteristics in Angus-Holstein cows and their progeny[J].Journal of Animal Science,1973,36(2):313–317.
[23] ANDERSON J W,KONZ E C.Obesity and disease management:effects of weight loss on comorbid conditions[J].Obesity Research,2001,94(Suppl.11):326S–334S.
[24] ADIBI S A,MERCER D W.Protein digestion in human intestine as reflected in luminal,mucosal,and plasma amino-acid concentrations after meals[J].Journal of Clinical Investigation,1973,52(7):1586–1594.
[25] YEN J T,KERR B J,EASTER R A,et al.Difference in rates of net portal absorption between crystalline and protein-bound lysine and threonine in growing pigs fed once daily[J].Journal of Animal Science,2004,82(4):1079–1090.
[26] LANGER S,FULLER M F.Interactions among the branched-chain amino acids and their effects on methionine utilization in growing pigs:effects on nitrogen retention and amino acid utilization[J].British Journal of Nutrition,2000,83(1):43–48.
[27] WILTAFSKY M K,PFAFFL M W,ROTH F X.The effects of branched-chain amino acid interactions on growth performance,blood metabolites,enzyme kinetics and transcriptomics in weaned pigs[J].British Journal of Nutrition,2010,103(7):964–976.
[28] GATNAU R,ZIMMERMAN D R,NISSEN S L,et al.Effects of excess dietary leucine and leucine catabolites on growth and immune-responses in weanling pigs[J].Journal of Animal Science,1995,73(1):159–165.
[29] CERVANTES-RAMÍREZ M,MÉNDEZ-TRUJILLO V,ARAIZA-PIÑA B A,et al.Supplemental leucine and isoleucine affect expression of cationic amino acid transporters and myosin,serum concentration of amino acids,and growth performance of pigs[J].Genetics and Molecular Research,2013,12(1):115–126.

Effects of Dietary Isoleucine Level on Growth Performance, Carcass Traits and Meat Quality of Finishing Pigs

LUO Yanhong　ZHANG Xin　QIN Chunfu　JIAO Ning　YIN Jingdong*

（*State Key Lab of Animal Nutrition, College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*）

*Corresponding author, professor, E-mail: yinjd @cau.edu.cn　　（责任编辑　菅景颖）

Abstract: This experiment aimed to investigate the effects of dietary isoleucine level on growth performance, carcass traits and meat quality of finishing pigs. Seventy-two Duroc×Landrace×Large White barrows with the body weight of (77.0±0.1) kg were assigned into three groups with 6 replicates per groups and each replicate had 6 barrows. The barrows in the three groups were fed diets contained 0.25% (low isoleucine level which showed isoleucine deficiency; L-Ile group), 0.39% (NRC recommended level of isoleucine; N-Ile group, as control group) and 0.53% (high isoleucine level which showed isoleucine excess; H-Ile） standardized ileal digestible isoleucine, respectively. The experiment lasted for 28 days. The results showed that dietary isoleucine level had no effects on average daily gain and average daily feed intake of finishing pigs ($P>0.05$), but the feed/gain of finishing pigs in L-Ile group was significantly increased compared with control group ($P<0.05$). As the isoleucine level increasing, the content of intramuscular fat in longissimus dorsi was linear improved ($P<0.05$), while the shear force was linear decreased ($P<0.05$). Compared with the control group, the back-fat depth, loin eye area and flesh color score of finishing pigs fed isoleucine deficient diet were significantly reduced ($P<0.05$), and the hot carcass weight, dressing percentage, and drip loss and yellowness value of longissimus dorsi of finishing pigs fed isoleucine deficient or excess diets were significantly reduced ($P<0.05$). As dietary isoleucine level increasing, serum triglyceride content was linear increased ($P<0.05$), while serum urea nitrogen content was linear decreased ($P<0.05$). Compared with the control group, the serum glucose content of finishing pigs fed isoleucine excess diet was significantly increased ($P<0.05$), while the concentrations of serum free essential amino acids, non-essential amino acids and total amino acids of finishing pigs fed isoleucine excess diet were significantly reduced ($P<0.05$), and the contents of serum total cholesterol, low density lipoprotein and high density lipoprotein of finishing pigs fed isoleucine deficient or excess diets were significantly reduced ($P<0.05$). The results indicate that isoleucine deficient diet has a negative effect on growth performance, carcass traits and intramuscular fat content of finishing pigs, but isoleucine excess diet can significantly reduce the shear force and drip loss of muscle and increase the intramuscular fat content of finishing pigs, even at the cost of reducing hot carcass weight and dressing percentage.

Key words: isoleucine; growth performance; carcass traits; meat quality; serum physiological and biochemical indexes; serum free amino acids